

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung	1
2. Anwendung der Plasmatechnik bei der Stahlerzeugung	7
2.1 Gegenüberstellung Lichtbogentechnik - Plasmatechnik	7
2.2 Plasma-Schmelzöfen	14
2.2.1 Gleichstrom - Plasma-Schmelzöfen	14
2.2.2 Drehstrom - Plasma-Schmelzöfen	17
2.3 Plasma - Pfannenöfen	17
2.3.1 Gleichstrom - Plasma - Pfannenöfen	20
2.3.2 Drehstrom - Plasma - Pfannenöfen	22
2.4 Stranggießverteiler mit Plasma - Beheizung	22
3. Ermittlung der Stoffdaten thermischer Plasmen	25
3.1 Charakterisierung von Plasmen	25
3.1.1 Thermische Plasmen	25
3.1.1.1 Vollständiges thermodynamisches Gleichgewicht	25
3.1.1.2 Lokales thermodynamisches Gleichgewicht	27
3.1.2 Zweitemperaturplasma	27
3.2 Elementare Plasmaprozesse	27
3.3 Zusammensetzung thermischer Plasmen	29
3.3.1 Ionisationsgleichgewichte: SAHA-EGGERT-Gleichung	29
3.3.2 Zustandssumme	32
3.3.3 Dissoziations- und Ionisationsgrad	35
3.3.4 Erniedrigung der Ionisationsenergie	36
3.3.5 Lösung des Gleichungssystems	37
3.4 Zustands- und Transportgrößen thermischer Plasmen	38
3.4.1 Dichte	39
3.4.2 Innere Energie und Enthalpie	39
3.4.3 Elektrische Leitfähigkeit	41
3.4.4 Wärmeleitfähigkeit	43
3.4.5 Strahlung	44
3.5 Ergebnisse der Stoffwert-Routine	46
4. Modellbildung von Lichtbogen und Plasmastrahl	55
4.1 Grundgleichungen	55
4.2 Kanalmodell des statischen Bogens	57

4.2.1	Leistungsbilanz für den Bogenkanal	58
4.2.1.1	Zugeführte elektrische Leistung	59
4.2.1.2	Abgeführte Wärme- und Enthalpieströme	60
4.2.1.3	Strahlung	60
4.2.1.4	Konvektion	60
4.2.2	Steenbecksches Minimumprinzip	62
4.2.3	Berechnung der stationären Bogenkennlinien	63
4.3	Simulationsergebnisse für den statischen Bogen	65
4.3.1	Bogen als optisch dünner Strahler mit Absorption	65
4.3.2	Bogen als optisch dünner Strahler mit Absorption und Massen-austausch durch den "Jet"-Strom	66
4.4	Kanalmodell des dynamischen Bogens	69
4.4.1	Leistungsbilanz für den Bogenkanal	70
4.4.2	Massenbilanz des dynamischen Bogens	71
4.4.3	Lösungsalgorithmus	73
4.5	Simulationsergebnisse für den dynamischen Bogen	75
4.5.1	Brennerstromversorgung mit Thyristorstromstellern	75
4.5.2	Brennerstromversorgung mit Strombegrenzungsdrosseln	84
4.5.2.1	Einphasiges Ersatzschaltbild mit nichtlinearem Bogen	84
4.5.2.2	Simulationsergebnisse für das einphasige Ersatzschalt- bild	88
4.5.2.3	Simulationsergebnisse für den Bogen	91
4.5.3	Oberschwingungen des dynamischen Bogens	101
4.5.3.1	Brennerstromversorgung mit Thyristorstromstellern	101
4.5.3.2	Brennerstromversorgung mit Strombegrenzungsdrosseln	105
5.	Experimentelle Untersuchung eines Drehstrom-Plasmaofens	107
5.1	Beschreibung der Anlage und der Meßwerterfassung	107
5.2	Betriebsergebnisse von Schmelzversuchen	113
5.3	Energetischer Vergleich Plasmaofen - Elektrolichtbogenofen	122
6.	Modellbildung und Betriebsergebnisse des Plasma-Pfannenofens	129
6.1	Thermisches Modell für den Plasma-Pfannenofen	129
6.1.1	Modellbildung für die Pfanne	129
6.1.1.1	Energiebilanz der Schmelze	130
6.1.1.2	Wärmeübertragung im Pfannenfreibord	131
6.1.1.3	Wärmeleitung in der Schlacke	133
6.1.2	Modellbildung für den Plasma-Pfannenofen	135

6.1.2.1 Energiebilanz der Schmelze	138
6.1.2.2 Wärmeübertragung im Pfannenfreibord	141
6.1.2.3 Modell der Brennerkühlung	143
6.2 Ergebnisse der Modellrechnungen	146
6.2.1 Thermisches Verhalten von Schmelze und Pfanne ohne Heizung	146
6.2.2 Thermisches Verhalten von Schmelze und Pfanne mit Plasma-Heizung	150
6.3 Einfluß der Pfannengröße	170
6.3.1 Thermisches Verhalten von Pfanne und Schmelze ohne Pfannenofen	171
6.3.2 Thermisches Verhalten von Pfanne und Schmelze mit Beheizung	173
6.4 Betriebsergebnisse des Plasma-Pfannenofens mit 30t-Pfanne	175
6.4.1 Anlagentechnik	175
6.4.2 Versuchsergebnisse für den Plasma-Pfannenofen	177
6.5 Energetischer Vergleich des Plasma-Pfannenofens mit dem konventionellen Pfannenofen	181
7. Modellbildung und Simulationsgebisse für den Stranggießverteiler mit Plasma-Heizung	188
7.1 Aufgabe und Aufbau des Stranggießverteilers	189
7.2 Schematische Darstellung des thermischen Verhaltens des Systems Stahlgießpfanne-Stranggießverteiler	191
7.2.1 Thermisches Verhalten des Systems ohne Plasma-Heizung	193
7.2.2 Optimierung des thermischen Verhaltens des Systems durch Plasma-Heizung	194
7.3 Modellbildung des Stranggießverteilers mit Plasma-Heizung	195
7.3.1 Stand der Modellbildung für das thermische Verhalten von Stranggießverteilern	197
7.3.2 Zellenmodell zur thermischen Beschreibung des Stranggießverteilers mit Plasma-Beheizung	197
7.3.3 Vorheizung des Stranggießverteilers	199
7.3.4 Verteiler füllen	201
7.3.4.1 Massenbilanz	201
7.3.4.2 Energiebilanz	204
7.3.4.3 Wärmeübergang im Freibordbereich	206
7.3.5 Stationäres Gießen	208
7.3.6 Verteiler leeren	208

7.4 Ergebnisse der Modellrechnungen	209
7.4.1 Simulationsergebnisse für einen 6-Strang-Verteiler	209
7.4.1.1 Thermisches Verhalten von Schmelze und Stranggießverteiler ohne Plasma-Heizung	209
7.4.1.2 Thermisches Verhalten von Schmelze und Stranggießverteiler mit Plasma-Heizung	219
7.4.2 Simulationsergebnisse für einen 3-Strang-Verteiler	228
7.4.2.1 Thermisches Verhalten von Schmelze und Stranggießverteiler ohne Plasma-Heizung	228
7.4.2.2 Thermisches Verhalten von Schmelze und Stranggießverteiler mit Plasma-Heizung	230
8. Zusammenfassung	236
Literaturverzeichnis	238
Literatur Kapitel 1	238
Literatur Kapitel 2	238
Literatur Kapitel 3	244
Literatur Kapitel 4	246
Literatur Kapitel 5	249
Literatur Kapitel 6	251
Literatur Kapitel 7	253
Anhang	256
Anhang A: Herleitung der SAHA-EGGERT-Gleichung für Dissoziation	257
Anhang B: Daten für Moleküle, Atome und Ionen	258
Anhang C: Herleitung der Differentialgleichung zur Bilanzierung des dynamischen Plasmastrahls	260
Anhang D: Kreisdiagramm des elektrischen Lichtbogenofens	261
Anhang E: Parameter der Modelle für die 30t-Pfanne und Pfannenofen	266
Anhang F: Optimale zylindrische Pfannengeometrie	270
Anhang G: Einstrahlzahlen für den Stranggießverteiler	272
Anhang H: Parameter des gekoppelten Systems Stahlgießpfanne - Stranggießverteiler	274